

## 林内光環境の測定法の検討

### (I) 全天光の測定条件

矢 田 豊

#### I はじめに

林内の光環境を把握するために、全天光の光強度と林内の測定点の光強度の相対値を用いることが多い。その場合、全天光の測定は対象林分の林冠上方で測定することが理想とされているが実際にはそれは困難で、近くの解放地での測定値により代替することが多い(1)。その時、どの程度の開空度があれば全天光と見なし得るか、またどのくらい近くなれば対象林分と同等の光条件であるか、見なし得るかについては、詳細な測定例は少ない。そこで、本報では光強度の指標として照度を取り上げ、また天空写真の画像解析処理を援用し、全天光の測定条件について若干の測定を行った結果について報告する。

また、これらの検討を行う際に必要となる、雲の状態による全天照度の変化の特性についての基礎的測定を行った。

なお、本研究の一部は林業普及情報活動システム化事業「森林施業の高度化に関する総合調査」において実施したものである。

#### II 測定システム

##### 1 A/D変換器を用いた照度の短周期測定

雲の状態による全天照度の変化の特性の把握や、測定時差のない瞬間測定値を必要とする場合には、1秒以下の間隔での照度測定が可能なシステムがあると都合がよい。そこで、照度計の電圧出力をA/D変換してラップトップコンピュータに直接取り込むシステムを構築した(以下、短周期測定システムと略)。照度計はミノルタのT-1H、A/D変換器はカノーブス社のCAD12-4、ラップトップコンピュータはNECのPC-9801NまたはPC-9801LV21を用いた。CAD12-4は外形57mm×132mm×195mmと比較的小型で、RS-232C規格のケーブルによってラップトップコンピュータと接続・通信する。また、外部電源として9Vの直

流電源を必要とする(乾電池で供給可)が、コンピュータからRS-232Cポートを通じて電源を得ることもできる。今回使用したコンピュータでは、PC-9801Nではバッテリー容量が小さく実用的でなかったが、同LV21では実用的な使用時間を得ることができた。変換データの取り込みとMS-DOSテキストファイル出力のためのソフトウェアはマイクロソフト社のQuick Basicを用いて自作した。ソフトウェア上の制限から、今回のシステムではサンプリングレートは約5回/秒、連続測定可能時間は約1時間45分とした。なお、T-1Hのアナログ信号出力の90%応答時間は通常使用状態(FASTモード)で1msec、CAD12-4の変換時間は80msec以下である。また、コンピュータでの記録レンジは、T-1Hの測定精度に対応した、有効数字3桁となっている。

##### 2 データロガーを用いた照度の長周期測定

長時間にわたって一定間隔での照度測定・記録を行うために、1チャンネルのデータロガーを用いた2方式のシステムを使用した(以下、長周期測定システムと略)。ひとつめはミノルタのT-1Hとコーナシステム社のデータロガー、KADEC-UVを使用したものであり、もうひとつは小糸製作所の照度センサIKS-15とコーナシステム社のデータロガー、KADEC-USを接続したものである。KADEC-UVでは最短10秒間隔、KADEC-USでは最短1分間隔での測定が可能であり、ともに30,720データの連続記録が可能である。測定終了後、RS-232Cポートによって、パーソナルコンピュータへのデータ転送を行う。

それぞれのシステム間の器差の補正のために、1台のT-1Hの直読値を基準として検量線を求めた。また、短周期測定システムと同時に用いる場合には、測定の度に5分程度同じ場所で測定を行い、その測定結果を基にして補正を行った。

##### 3 天空写真撮影

照度測定時の雲の状態の記録、および測定場所

の開空度測定のために魚眼レンズによる天空写真撮影を行った。使用カメラはミノルタのX-700、レンズはMD FISH-EYE 7.5mmF4（全周魚眼レンズ）である。また、測定作業の迅速化のために、通常の一眼鏡カメラ用三脚、水準器のついた自由雲台（Velbon QUICK LEVELER）、直角アダプタ（BENBO社）、アングルファインダー（ミノルタ ANGLE FINDER V<sub>N</sub>）、および液浸式の方角磁石を組み合わせて用いた（図-1 以下、天空写真撮影システムと呼ぶ）。本システムにより、レンズ光軸を垂直にし、かつ方位を固定した天空写真撮影が迅速に実施できる。本システムは林内での天空写真撮影にも使用できる。なお、フィルムはフジカラー SUPER HG 100（ASA 感度100）を用いた。

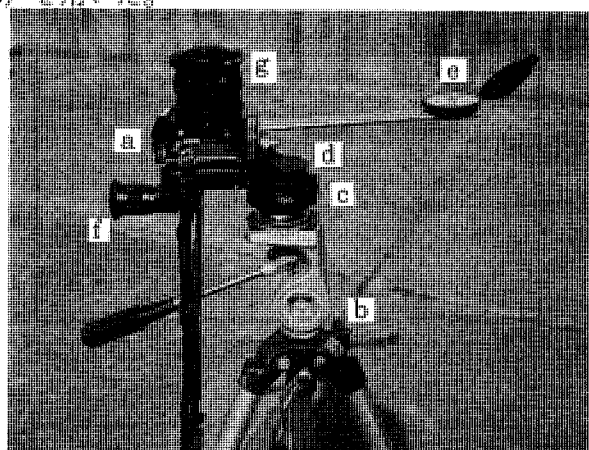


図-1 天空写真撮影システム

- a カメラ本体 b 三脚 c 自由雲台  
d 直角アダプタ e 方位磁石  
f アングルファインダー g 魚眼レンズ

#### 4 天空写真の画像処理

天空写真の画像情報を定量化するための画像処理は、パーソナルコンピュータ（NEC PC-9801 DA/U2）とその周辺機器およびソフトウェアによって行った（以下、画像処理システムと呼ぶ）。

まず、天空写真をイメージスキャナ EPSON GT-6000と同機器からの画像取り込みが可能な描画ソフト Zeit社 Z's STAFF KiD によりカラー画像情報としてファイル化した。画像上の解析対象以外へのマスク処理等にも本ソフトウェアを用いた。また、その他の画像処理と dot 計数作業には、汎用画像処理ソフトウェア PIMPOM (2) を用いた。本ソフトウェアは、画像処理には機械語ルーチンを使用しており、高速な画像処理を実

現している。また、簡単なマクロ言語を登録しており、一定の処理作業を登録することができる。

### III 雲の状態による照度の変化

#### 1 目的

光強度の相対値を測定する場合、全光条件下と散光条件下ではその値が変わってくるため、異なる地点間の比較を行う場合にはどちらかに統一して測定を行うべきであると言われている (1)。また、このことより「晴れたり曇ったり」の時の測定は避けるべきであるとされている。しかし、安定した全光条件または散光条件となる雲の状態の、定量的な指標についてはあまり報告例がない。そこで、各種条件下において照度を測定し、その特性を定量的に把握することを試みた。

#### 2 測定方法

照度の短周期測定システムを用い、種々の雲の状態の時に照度を5分間、測定した。表-1に測定日時を示す。測定はすべて10時から15時までの間に行った。本報では、各測定時間の照度の変化の度合いを、単位時間あたりの変化率で示すことにする。すなわち、単位時間（ここでは0.2秒）ごとの測定値のn番目の照度測定データを $I_n$ (klux)、としたときに、次式で表される変化率 $R_n$ (%)を求める。

$$R_n = |I_n - I_{n-1}| / I_n \times 100$$

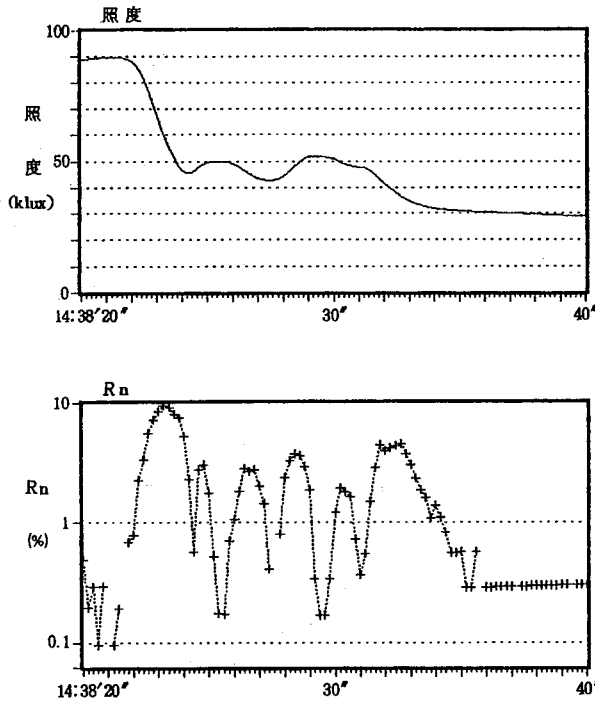
また、測定時間内のすべての $R_n$ の平均値を $\bar{R}_n$ 、最大値を $R_n \max$ と表記する。

また、照度測定時に天空写真を撮影し、画像処理システムにより光強度の安定状態の解析を試みた。通常の35mmフィルムの発色感度には、フィルムの製造工程、現像工程等の条件の違いによって、かなりのばらつきが生じる。よってその画像を解析する場合は色情報そのものを対象とするのは難しい。そこで今回は雲の分布状態による、天空写真上の色の境界線の長さを検出することを考え、以下の条件で測定を行った。すなわち、撮影はAEモードで行い、現象および焼き付けは通常のDPEサービスに依頼し、プリントの大きさは手札サイズに、全周を写し込んだ状態で同じ調子で焼き付けた。Z's STAFF KiDによる画像取り込み時のパラメータは、解像度90dpi、コントラスト7（最大）、濃度補正1で、中間調処理は行わ

表-1 雲の状態による照度変化の測定条件

測定No.	測定日	測定開始時間	写真撮影時間	照度最大	照度最小	照度平均 (klux)	$R_n$ max	$R_n$ (%)
1	1991.8.26	10:58'00"	11:10'30"	133	39.5	84.4	5.61	0.61
2	8.26	13:58'00"	14:00'00"	99.5	60.8	96.4	5.90	0.21
3	8.26	14:38'00"	14:40'00"	89.7	23.0	37.8	9.54	0.55
4	8.27	11:14'00"	11:13'02"	110	109	109	0.40	0.08
5	8.28	10:34'00"	10:34'03"	98.0	96.9	97.4	0.54	0.07
6	8.28	11:25'00"	11:25'01"	113	81.3	103	1.49	0.14
7	8.28	13:31'00"	13:31'34"	104	42.0	76.8	2.31	0.41
8	8.28	13:50'00"	13:54'01"	31.9	25.5	28.5	1.15	0.07
9	8.31	12:54'00"	12:55'09"	37.0	15.6	26.9	0.98	0.06
10	9.4	14:40'00"	14:42'07"	65.2	62.0	64.0	0.14	0.03
11	9.5	10:05'00"	10:05'52"	92.1	86.1	89.8	0.29	0.03
12	9.21	11:31'00"	11:36'00"	114	28.8	55.9	7.40	0.89

測定No. 3



測定No. 7

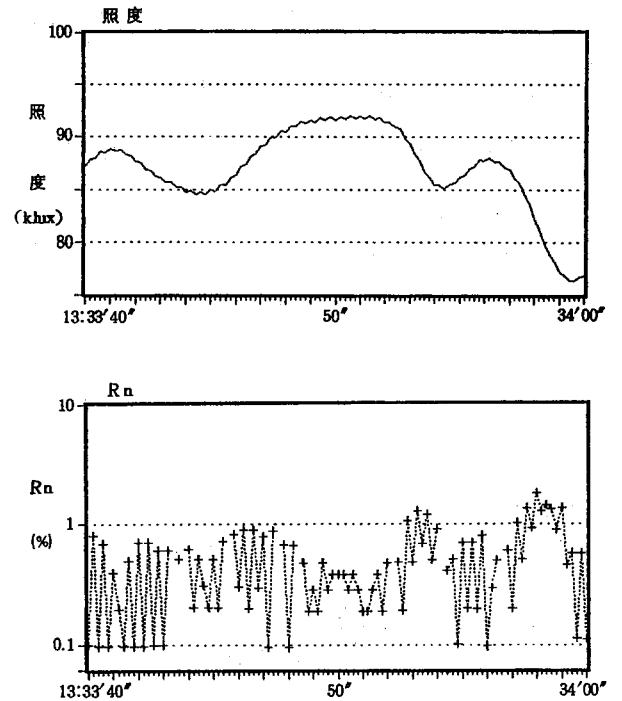


図-2 短周期測定システムによる照度測定例

ず単純2値モードで処理した。また、PIMPOMにおいてノイズ除去のため $3 \times 3$  dotのメディアン処理を3回行い、境界抽出処理により色の境界を検出後、dot計数処理により境界線の長さ(以下、LCB: Length of Color Borderと呼ぶ)を計数した(2)。

### 3 結果および考察

各測定日時における照度の最大・最小、および

全測定値の平均を表-1に示す。測定時の照度は23~133 kluxの間であった。また、 $\overline{R_n}$ は0.03~0.9%、 $R_n$  maxは0.14~9%の間であった。本測定中最も $R_n$  maxが大きかった測定No.3の8月26日14時38分0秒~20秒と、照度および $R_n$ の細かい変動が確認された測定No.7の8月28日13時33分40秒~34分0秒の、照度および $R_n$ の経時変化を図-2に示す。このように、最も照度変化の大き

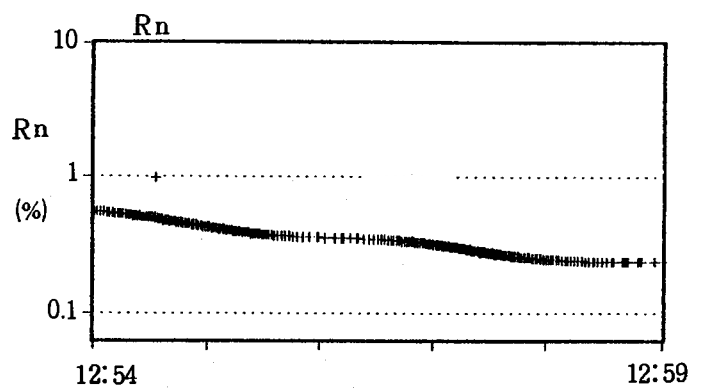
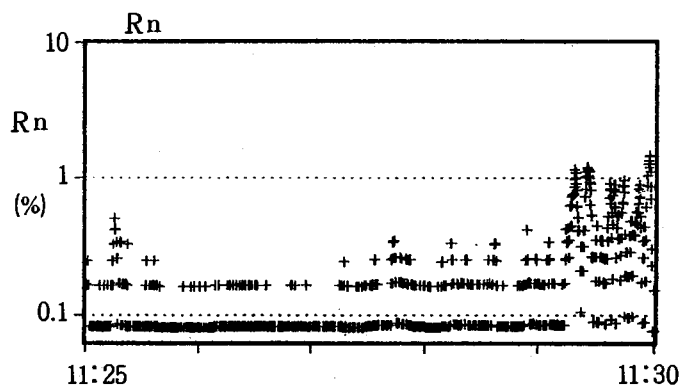
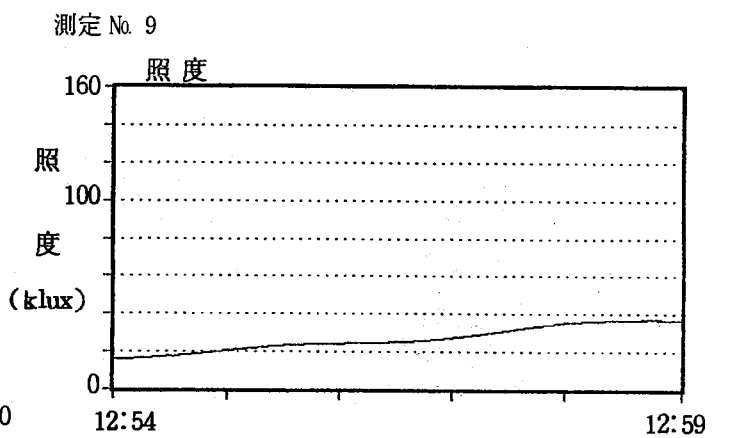
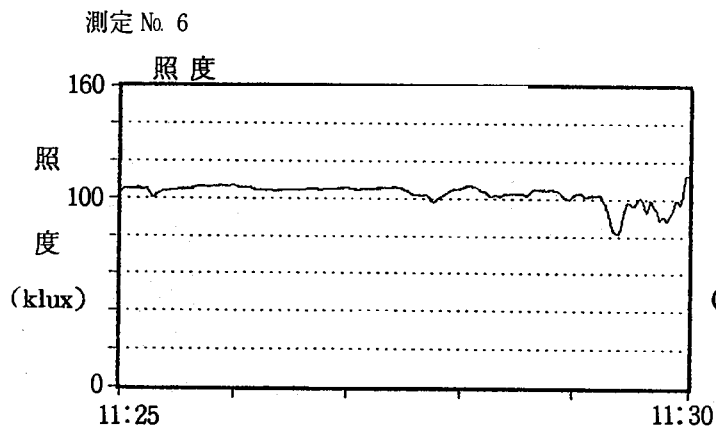
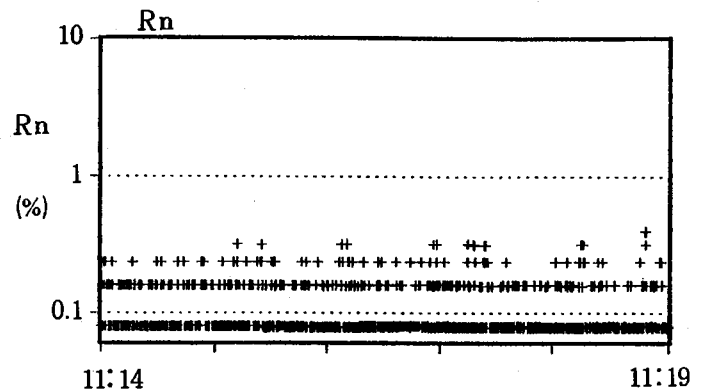
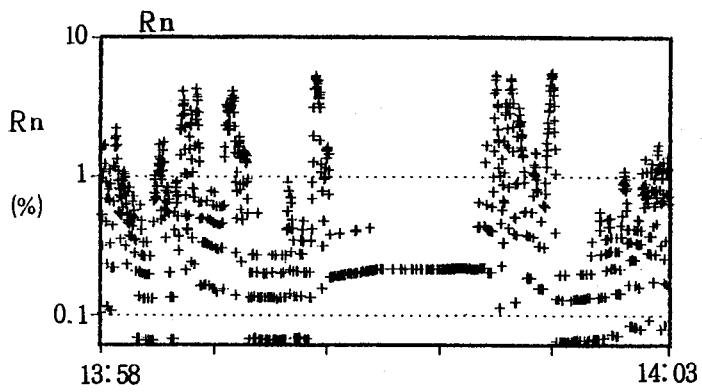
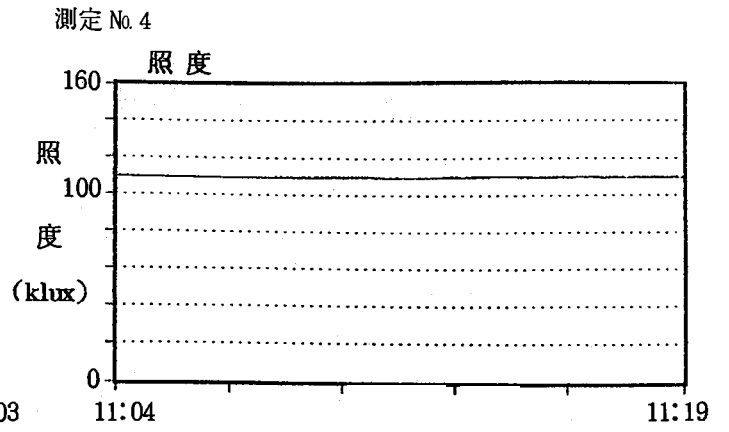
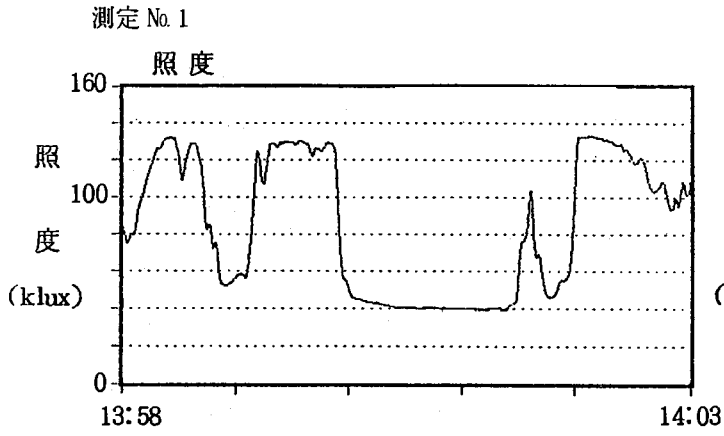
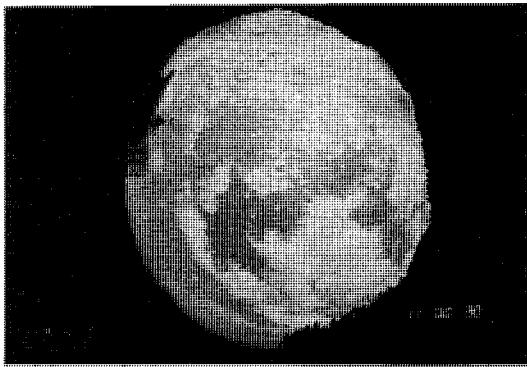
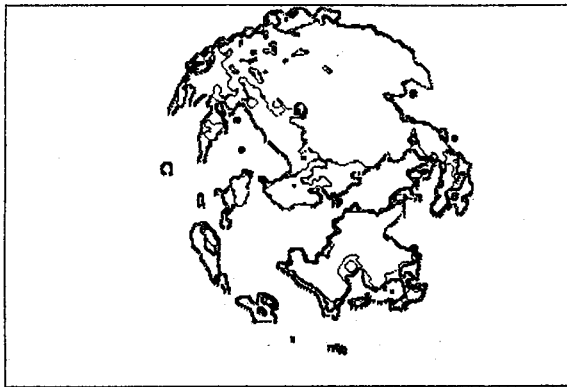


図-3 雲の状態による照度および Rn の変化

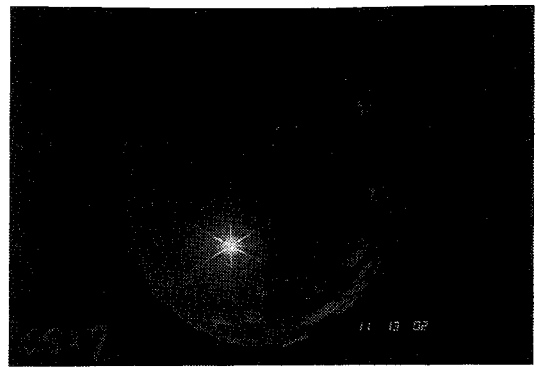
測定No. 1  
天空写真



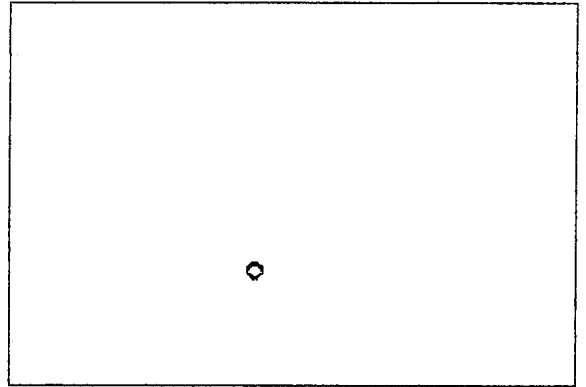
処理画像 (LCB: 7301)



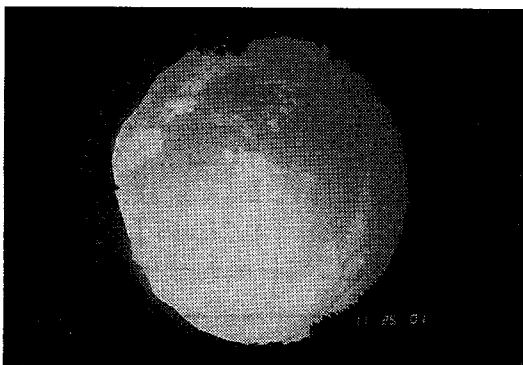
測定No. 4  
天空写真



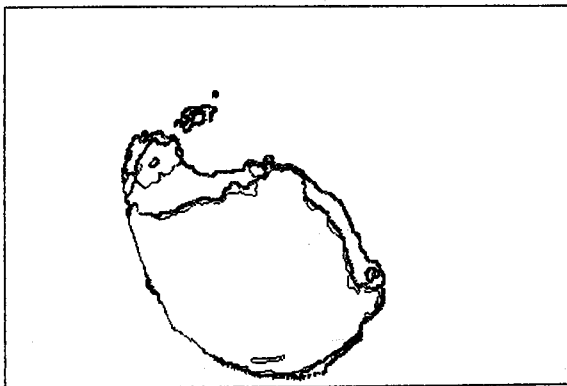
処理画像 (LCB: 70)



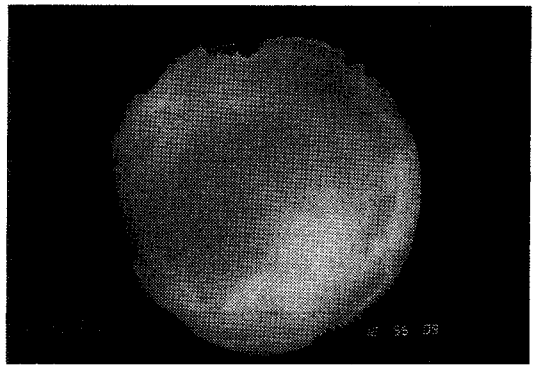
測定No. 6  
天空写真



処理画像 (LCB: 3088)



測定No. 9  
天空写真



処理画像 (LCB: 1538)

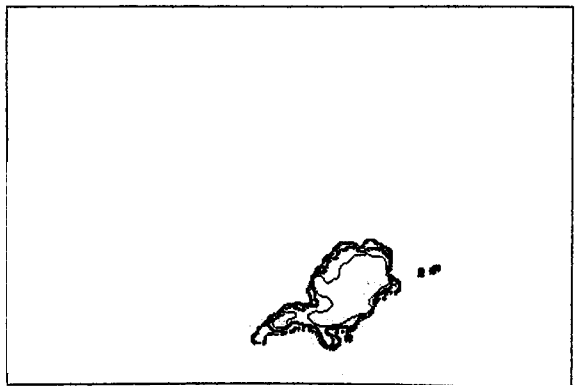


図-4 天空写真と処理画像

い時にも、約0.2秒間隔の測定により照度変化はほぼ滑らかな曲線で近似された（測定No.3）。一方、測定No.7の場合にはより微細な周期の変動が発生している可能性もあるが、詳細は不明である。

5分間の照度および $R_n$ の経時変化の例を図-3に示す。また、図-3の測定No.に対応した、天空写真とその処理画像を図-4に示す。このように、雲の輪郭は必ずしも正確には検出されていないが、その傾向は十分に把握できた。

$\bar{R}_n$ 、 $R_n \max$ とLCBとの関係を片対数軸上に示したのが図-5である。 $\bar{R}_n$ 、 $R_n \max$ とも、3点を除けば、ばらつきは大きいがほぼシグモイド曲線状の変化を示した。LCBが約2,300の測定No.10および11では、照度変化に影響を及ぼさない太陽周辺光(3)による空の色の違いが検出され、LCBがより過大となったものと思われる。またLCBが5,860の測定No.8では照度変化に影響の少ない、層状の雲の細部の色の違いが検出され、LCBがより過大となったものと思われる。これら以外では、LCBが2,000以下で $R_n \max$ は1%以下、 $\bar{R}_n$ は0.1%以下となり、比較的安定した状態となる。これは、太陽の周囲に雲がほとんどない状態か、切れ目のない厚い雲が全天にかかっている場合である。このように、LCBは光強度の安定状態の、定量的な指標として用いることができそうである。さらに厳密な定量化を行う場合には、撮影条件の検討や赤外線写真の使用等の検討が必要であろう。

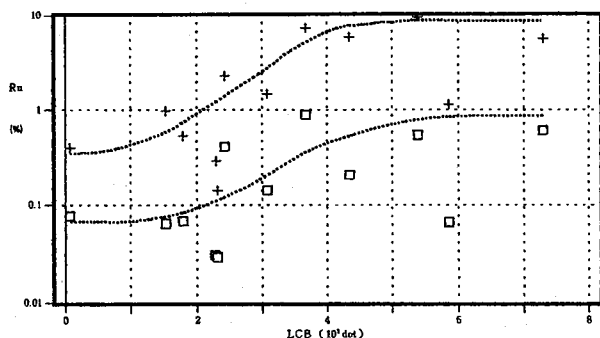


図-5 色境界線長 (LCB) と  $R_n$  の関係

## IV 開空度の違いによる全天照度の変化

### 1 目的

全天光強度を、測定対象林分の近くの解放地での測定により代替する場合、どの程度の開空度があれば全天光と見なし得るかについて検討した。全光条件下の天球における光強度は、太陽を中心としたおよそ $10^\circ$ 程度の範囲で非常に強く、それより離れると急激に減少するという(3)。また厚さ約150m以上の層状の雲に覆われた理想的な散光条件下では、天頂で最も明るく水平線の方へ次第に暗くなるという(3)。これらのことから、開空度の違いによる全天照度の変化についても全光条件と散光条件を区別して検討する必要がある。

### 2 測定方法

上述の全光条件下での光分布特性を考慮に入れば、太陽を中心とした角度を基準とした開空度の評価が必要となるが、ここでは実用上のことを考え、全光条件・散光条件ともに南北の半球ごとに遮蔽物上端の仰角の平均値を求め、開空度の指標とした。

照度の測定は短周期測定システム、および長周期測定システムを用いて、十分な解放地と考えられる場所との相対値を求めた。測定条件を表-2に示す。測点間の距離はすべて100m以内である。また、遮蔽の程度は東西にほぼ直線的な林縁からの距離により、調整した。1測点における測定は10秒間隔で約5分間とし、計約30の測定値の平均値を求めた。測定時の光条件はⅢの結果を参考に、なるべく安定した状態を選んだが、測定時間内に照度の急激な変化があり、測点間の照度の関係に乱れが生じた場合(およそ $R_n$ :0.3%以上の時)にはそのデータは集計には用いなかった。また、そのような悪条件が多かったと判断された時には、同じ場所で再度約5分間の測定を行い、別の測定No.を付した。

遮蔽物の仰角の平均値は、天空写真の画像解析により求めた。撮影はAEモードで行い、現像および焼き付けは通常のDPEサービスに依頼し、プリントの大きさは手札サイズに、全周を写し込んだ状態で同じ調子で焼き付けた。Z's STAFF KiDによる画像取り込み時のパラメータは、解像度90 dpi、コントラスト1(最小)とし、濃度

表-2 開空度の違いによる全天照度の変化の測定条件

測定 No	測定日時	開始時間	終了時間	測点数	光条件	遮蔽物方位	平均仰角 (°)
1	1991.8.28	10:44'00"	10:49'00"	30	全光	S	29
2	8.28	10:55'00"	11:00'00"	27	全光	S	37
3	8.29	10:00'00"	10:05'00"	31	散光	+	5
4	8.29	10:11'00"	10:16'00"	26	散光	S	17
5	8.29	10:20'00"	10:25'00"	20	散光	S	24
6	8.29	10:28'00"	10:33'00"	19	散光	S	24
7	8.29	10:36'00"	10:41'00"	31	散光	S	14
8	8.29	10:43'00"	10:48'00"	26	散光	S	14
9	8.29	10:54'00"	11:07'00"	34	散光	N	21
10	8.29	11:13'00"	11:18'00"	28	散光	N	26
11	9.21	10:15'00"	10:20'00"	31	全光	+	9
12	9.21	10:23'00"	10:28'00"	31	全光	S	16
13	9.21	10:32'00"	10:37'00"	31	全光	S	20
14	9.21	10:40'00"	10:45'00"	29	全光	S	25
15	9.21	10:47'00"	10:50'00"	19	全光	S	25
16	9.21	11:00'00"	11:05'00"	25	全光	N	30
17	9.21	11:07'00"	11:12'00"	31	全光	N	22
18	9.21	11:14'00"	11:19'00"	31	全光	N	20

補正は主に5としたが、空と地上物の境界が明瞭となるよう、適宜調整した。中間調処理は行わず単純2値モードで処理した。本処理により、地上の遮蔽物のみが、黒で表現された。次に、画像の外周円、および天頂を通る東西の直線を境界として、測定対象部分以外の黒の dot の部分を白にマスクングした。この処理画像をPIMPOM上に読み込み、黒の dot の計数を行った。このようにして求めた天空画像上の半球ごとの遮蔽物の面積(単位: dot<sup>2</sup>)を、以下の数値処理によって仰角の平均値に置き換えた。

外周の半径 R dot、内周の半径 r dot で囲まれたドーナツ形の、半分の面積 a dot<sup>2</sup> は、

$$a = (\pi R^2 - \pi r^2) / 2$$

これを r について解くことにより、対象とする遮蔽物の面積に相当する半ドーナツ形の内周の半径を求める次式が導かれる。

$$r = \sqrt{(\pi R^2 - 2a) / \pi} \quad \dots\dots(1)$$

また、使用したレンズの射影方式より、ネガフィルム上の画像高を y' mm、天頂角を ω ラジアン、レンズの焦点距離を7.5mmとすると、

$$y' = 7.5 \omega$$

ラジアンを360度数表示に変換し、また仰角 d で表示すると、

$$d = 90 - 24y' / \pi \quad \dots\dots(2)$$

手札サイズに焼き付けた天空写真は、直径約75.0mm (2.95 inch) となり、90 dpi でコンピュータに取り込むことにより半径133 dot となった。また、(2) 式の関係よりネガフィルム上での外周半径は11.8mmとなるので、y' と r の関係は次式のように表される。

$$y' = 0.0887 r \quad \dots\dots(3)$$

以上の(1)、(2)、(3)式により、遮蔽物の投影面積 a から平均仰角 d を導いた。

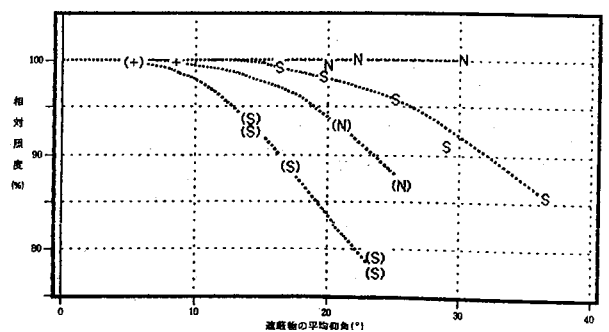


図-6 遮蔽物の平均仰角と相対照度の関係  
N/S: 遮蔽物の方位 x/(x): 全光条件/散光条件

表一 3 離れた2点間の照度の違いの測定条件

測定 No.	測定日	開始時間	終了時間	測定間隔	測点数	光条件	2点間の距離	
							水平距離 (m)	高低差 (m)
1	1991.8.27	14:27'00"	14:48'00"	60"	22	全光	630	50
2	8.31	13:03'40"	13:09'30"	10"	35	散光	150	20
3	8.31	13:15'10"	13:20'40"	10"	33	散光	400	50

### 3 結果および考察

遮蔽物の平均仰角と相対照度との関係を図一6に示す。前述の天球上の光分布特性(3)より予想されたとおり、光が全天に散乱している散光条件下で、遮蔽物の影響をより大きく受けた。また、散光条件・全光条件ともに南の遮蔽物の影響がより大となった。全光条件下での北側の遮蔽物は、今回測定した平均仰角 $30^\circ$ 以下で、照度に対する影響は認められなかった。全光条件下での南の遮蔽物の影響の度合いは、太陽の高度や太陽周辺光の広がりの違いにより変わってくるものと考えられる。また、散光条件下での南北の遮蔽物の影響の差は、雲の厚さにより変わってくる可能性がある。さらに、今回の散光条件下の測定において、全天光と見なせると仮定した遮蔽物の平均仰角( $5^\circ$ )が妥当であったかどうかは厳密には不明である。このように多くの問題はあがるが、今回の測定により大まかな傾向はつかめたものとする。

## V 離れた2地点間の照度の違い

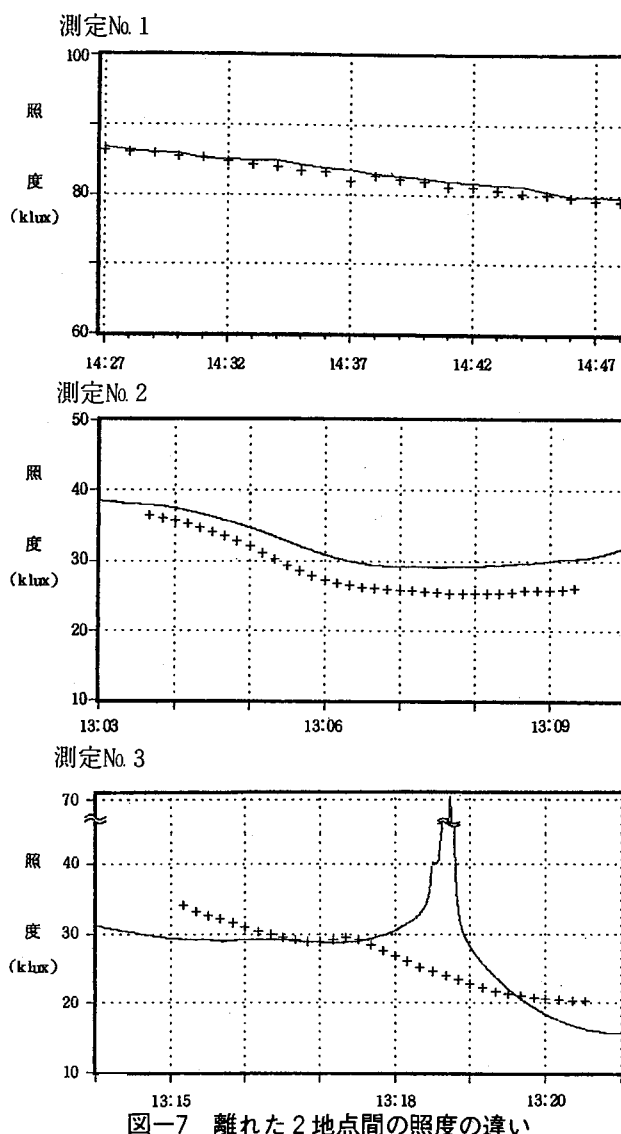
### 1 目的および方法

IVで求められた十分な開空度のある場所が対象林分の近くでない場合、どの程度の距離までなら誤差の小さい測定値を得られるかについて検討した。

測定は全光条件下で1回(測定No.1)、散光条件下で2回(測定No.2、3)、異なる距離で行った(表一3)。前者では短周期測定システム2基、後者では短周期測定システムおよび長周期測定システムを用いた。

### 2 結果および考察

各測定時の、2点間の照度の経時変化を図一7に示す。測定No.1では2点間の平均の相対比は99.3%であり、実用上差はないと言える。全光条件下では、光強度の変化に因する因子は地上の



図一7 離れた2地点間の照度の違い

遮蔽物以外にはほぼないと考えられる(3)ので、離れた測点間でも光強度は理論上は同じとなる。上記測定では、それが確認されたと考える。

一方、散光条件下の測定No.2では2点間の相対比はほぼ時間の経過に伴い96%から86%へと変化(平均89.6%)していた。また、測定No.3では短周期測定システムを設置した測定点で認められたサンスポットが、他方の測定点ではまったく認め



られなかった。サンスポットが記録される前の13時14分から18分間の $R_n$ は0.3%以下であり、また約20分前のLCB(Ⅲの測定No.9)も1,538と比較的安定していた。このように、散光条件下においては時間・空間的に少しでも離れば異なる変化をしている可能性がある。よって、対照測定点とする解放地は、測定対象林分に近ければ近いほど安全であろう。全光条件・散光条件いずれの場合についても、一般的な結論を導くためにはより多くの測定を行う必要があると考えられる。

## 引用文献

- (1) 藤森隆郎：光と成長に関する基礎知識. 複層林の生態と取り扱い, 15~56, 林業科学技術振興所, 1989
- (2) 森本吉春：パソコン画像処理ハンドブック 3 高速汎用画像処理プログラム PIMPOM, 452pp, 共立出版, 1988
- (3) 村井潔三：太陽エネルギー. 太陽エネルギーの分布と測定, 13~36, 学会出版センター, 1987